

ESTUDIO DE MODELOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CANAL DE RADIO EN COMUNICACIONES MÓVILES DE 2.5G Y 3G

F. R. Marante⁽¹⁾, R. Marante⁽²⁾, E. Y. Rodríguez⁽²⁾, J. A. García⁽³⁾

marante@electronica.ispjae.edu.cu, joseangel.garcia@unican.es

⁽¹⁾ Dpto. de Telecomunicaciones. Instituto Superior "José Antonio Echeverría".

⁽²⁾ Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S. A., ETECSA.

⁽³⁾ Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria.

Abstract- In this paper, a comparative study of the models usually employed in the radio channel characterization is developed. After introducing the criteria for their classification, the vectorial model is deeply described. Emphasis is made in the circular, elliptic, and gaussian approximations, taking into account the Doppler effect. Finally, the systems' behaviour is simulated in different scenarios, validating the corresponding models and evaluating several situations of practical interest for the introduction of intelligent antennas.

I. INTRODUCCIÓN

Las telecomunicaciones en la actualidad tienden a la convergencia de tecnologías, y se trabaja para que la información pueda viajar del transmisor al receptor a través de cualquier medio de comunicación. Para lograr esto la telefonía celular de 3G se presenta como el principal soporte, debido a la capacidad que tendría de llevar a un usuario móvil servicios como voz, datos, video, internet, audio de alta calidad, e-mail, entre otros.

En este contexto, es importante estudiar el canal de radio, lo que implica conocer los mecanismos fundamentales de propagación de las señales de radio, los factores de atenuación y las fuentes de distorsión. Con esta información se puede modelar matemáticamente dicho canal, y a su vez, utilizarle para diseñar apropiadamente sistemas moduladores y codificadores de canal.

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características del medio donde transitan las ondas electromagnéticas en un ambiente dado. Dicho ambiente de propagación, el área de cobertura, o el origen de los datos son algunos criterios que se utilizan actualmente para clasificarlos [1], en este último caso permitiendo una división entre modelos empíricos y teóricos.

En este artículo se presenta un estudio comparativo de los modelos usualmente empleados para la caracterización del canal de radio. Una vez introducidos los criterios para la clasificación de los modelos de propagación, el modelo vectorial se describe de un modo exhaustivo. Se enfatiza en las aproximaciones circular, elíptica y gaussiana, teniendo en cuenta el efecto Doppler. Para finalizar, se presentan simulaciones del comportamiento de los sistemas en diferentes escenarios, validando los modelos

correspondientes y ofreciendo una evaluación de diferentes situaciones de interés práctico para la introducción de antenas inteligentes.

II. MODELOS VECTORIALES DE PROPAGACIÓN

Dentro de los modelos teóricos, destacan los modelos vectoriales, los cuales predicen las características espaciales y temporales del canal, en cuyo estudio se centrará este trabajo. Se subdividen en modelos geométricos (circular y elíptico) y estadísticos (gaussiano).

A. Notación y Geometría

En la Fig. 1 se puede apreciar la notación y geometría típica a emplear en el trabajo con los modelos vectoriales [1].

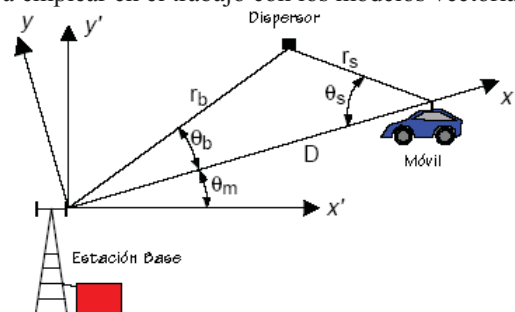


Fig. 1 Notación y geometría utilizadas en el estudio de los modelos vectoriales.

Se definen tres puntos fundamentales: la Estación Base, el Terminal Móvil y un objeto dispersor que representa una localización arbitraria. La esencia de este modelo radica en que la señal transmitida llega al receptor con una componente de trayectoria directa y muchas componentes multitrayecto provenientes de la interacción con un objeto dispersor (sólo se muestra una por cuestiones ilustrativas y de simplicidad).

B. Cálculo de la fdp conjunta AOA/TOA

Siguiendo las consideraciones teóricas recogidas en [2] sobre la señal, los dispersores, etc., es posible calcular uno de los parámetros fundamentales de los modelos vectoriales, la fdp conjunta ángulo de arribo/tiempo de arribo. La misma ofrece una medida de la ubicación más probable de los dispersores en el espacio. También brinda información del

ensanchamiento angular y de las características temporales de las señales interferentes, lo cual es muy útil tanto para el diseño de los arreglos de antenas como para la evaluación del rendimiento de los sistemas. En esencia esta función nos da la probabilidad conjunta de que la señal arribe con un ángulo y una demora determinada.

Partiendo de una función de dispersión $f_{x,y}(x,y)$ y las relaciones entre las coordenadas polares y rectangulares [3],

$$f_{r_b, \theta_b}(r_b, \theta_b) = \left. \frac{f_{x,y}(x,y)}{|J(x,y)|} \right|_{\substack{x=r_b \cos(\theta_b) \\ y=r_b \sin(\theta_b)}} \quad (1)$$

y después de obtener una expresión para r_b en función de τ ,

$$f_{\tau, \theta_b}(\tau, \theta_b) = \left. \frac{f_{r_b, \theta_b}(r_b, \theta_b)}{|J(r_b, \theta_b)|} \right|_{r_b = \frac{D^2 - \tau^2 c^2}{2(D \cos(\theta_b) - \tau c)}} \quad (2)$$

se puede obtener la expresión deseada:

$$f_{\tau, \theta_b}(\tau, \theta_b) = \frac{(D^2 - \tau^2 c^2)(D^2 c + \tau^2 c^3 - 2\tau c^2 D \cos(\theta_b))}{4(D \cos(\theta_b) - \tau c)^3} f_{x,y}(r_b \cos(\theta_b), r_b \sin(\theta_b)) \quad (3)$$

Cuando los dispersores se encuentren distribuidos siguiendo una fdp uniforme dentro de una región arbitraria, R_A , que posea un área, A , entonces la función de densidad de dispersión conjunta puede expresarse como:

$$f_{x,y}(x,y) = \begin{cases} \frac{1}{A} & : x, y \in R_A \\ 0 & : x, y \notin R_A \end{cases} \quad (4)$$

En este caso especial, la función de densidad conjunta AOA/TOA se reduce a:

$$f_{\tau, \theta_b}(\tau, \theta_b) = \frac{(D^2 - \tau^2 c^2)(D^2 c + \tau^2 c^3 - 2\tau c^2 D \cos(\theta_b))}{4A(D \cos(\theta_b) - \tau c)^3} \quad (5)$$

C. Cálculo de la fdp marginal AOA

La fdp marginal AOA puede obtenerse integrando la fdp conjunta AOA/TOA sobre el tiempo de arribo, sin embargo esto resulta demasiado complejo y engorroso. Una forma más sencilla resulta integrar la función $f_{r_b, \theta_b}(r_b, \theta_b)$ obtenida anteriormente sobre la región de dispersión como se muestra en la Fig. 2,

$$f_{\theta_b}(\theta_b) = \int_{r_{b1}(\theta_b)}^{r_{b2}(\theta_b)} f_{r_b, \theta_b}(r_b, \theta_b) dr_b = \int_{r_{b1}(\theta_b)}^{r_{b2}(\theta_b)} f_{x,y}(r_b \cos(\theta_b), r_b \sin(\theta_b)) dr_b \quad (6)$$

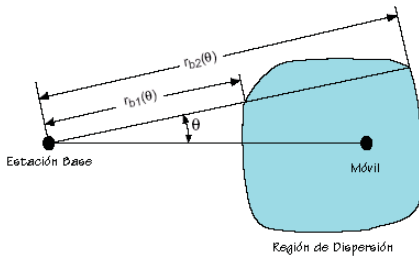


Fig. 2 Geometría utilizada para el cálculo de la fdp AOA.

Para una densidad de dispersión uniforme con $f_{x,y}(x,y)=1/A$, resulta:

$$f_{\theta_b}(\theta_b) = \int_{r_{b1}(\theta_b)}^{r_{b2}(\theta_b)} \frac{1}{A} dr_b = \frac{1}{2A} (r_{b2}^2(\theta_b) - r_{b1}^2(\theta_b)) \quad (7)$$

D. Cálculo de la fdp marginal TOA

De la misma manera la fdp marginal TOA, puede obtenerse integrando la fdp AOA/TOA esta vez sobre el ángulo de

arribo, pero también resulta muy complejo. Otra vía sería calcular la fda y luego derivarla con respecto a τ . La función fda TOA puede calcularse como la probabilidad de que un dispersor se sitúe en la región contenida por la elipse correspondiente a una demora igual a τ . Tomando la derivada de la función fda TOA obtendremos la función de densidad marginal TOA deseada,

$$f(\tau) = \frac{d}{d\tau} \iint_{A_\tau} f_{r_b, \theta_b}(r_b, \theta_b) dr_b d\theta_b \quad (8)$$

la cual quedaría, para el caso de una función de densidad de dispersión uniforme, como:

$$f_\tau(\tau) = \frac{1}{A} \cdot \frac{d}{d\tau} (A_\tau(\tau)) \quad (9)$$

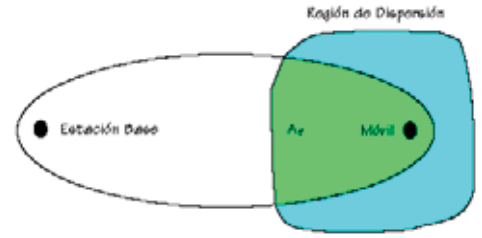


Fig. 3 Geometría utilizada para el cálculo de la fdp TOA.

E. Cálculo de la DEP Doppler

Este efecto es causado por el movimiento de alguna de las terminales de comunicación y produce distorsiones en la señal que se propaga por decorrelaciones temporales en el espectro. Además es un fenómeno selectivo en el tiempo pues depende de la dirección y velocidad del móvil, produciendo un ruido aleatorio de FM en la portadora de la señal.

La variación Doppler está dada por $f_d = f_m \cos(\theta_s - \theta_v)$, donde $f_m = v/\lambda$ es la máxima variación Doppler, θ_s es el ángulo de arribo de la señal, θ_v es la dirección en la que el móvil se encuentra viajando [4], v es la velocidad del móvil y λ es la longitud de onda de la portadora. Para observar como afecta el desvanecimiento Doppler a la portadora de la señal es necesario observar el comportamiento de la densidad espectral de potencia Doppler, la cual dimensiona la medida en que las distorsiones se han introducido por este concepto.

Usando el algoritmo de Ertel en [5], y partiendo de una señal típica de onda continua:

$$r(t) = \alpha e^{j2\pi f_d t} \quad (10)$$

la densidad espectral de potencia resulta en:

$$DEP = E\{p(f)\} \cdot f_{fd}(f) = \int_{p_l}^{p_u} p \cdot f_{p|fd}(p|f_d) \cdot f_{fd}(f) dp = \int_{p_l}^{p_u} p \cdot f_{p|fd}(p, f_d) dp \quad (11)$$

Calculando la función de densidad potencia-ángulo, se puede obtener:

$$DEP(f_d) = \frac{-D^2}{4A f_m \sqrt{1 - (f_d/f_m)^2}} \sum_{i=1}^2 \int_{x_l(i)}^{x_u(i)} \frac{(1-x^2)(1+x^2-2x \cos(\theta_i))}{x^n (\cos(\theta_i) - x)^3} dx \quad (12)$$

donde $x = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1/n}$, p_0 es la potencia de la señal que transita por

una trayectoria directa y n es el exponente de pérdidas de trayectoria.

F. Modelo Elíptico (Liberti)

En este modelo los dispersores se distribuyen uniformemente a lo largo de la elipse cuya abscisa mayor es

$c \cdot \tau_m$, donde τ_m es la demora máxima asociada con los dispersores dentro de la elipse y c es la velocidad de la luz. En los focos de la elipse se encuentran la estación base y el móvil. El modelo es apropiado para ambientes microcelulares donde la altura de la antena es relativamente baja. Con antenas bajas, la estación base puede recibir reflexiones multitrayecto tanto de lugares cercanos a ella como de la zona que rodea al móvil.

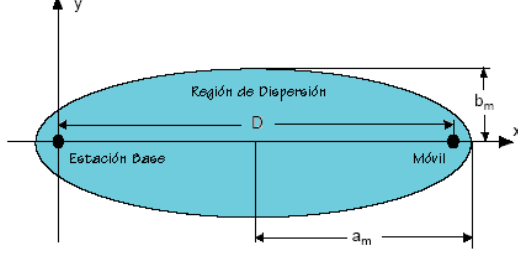


Fig.4 Geometría del modelo elíptico de Liberti.

Sustituyendo el área de la elipse en la fdp Conjunta AOA/TOA para un modelo de dispersión uniforme se obtiene,

$$f_{\tau, \theta_b}(\tau, \theta_b) = \begin{cases} \frac{(D^2 - \tau^2 c^2)(D^2 c + \tau^2 c^3 - 2\tau c^2 D \cos(\theta_b))}{4\pi a_m b_m (D \cos(\theta_b) - \tau c)^3} : D/c \leq \tau \leq \tau_m, \theta_b \neq 0 \\ \frac{c(D + \tau c)}{4\pi a_m b_m} : D/c \leq \tau \leq \tau_m, \theta_b = 0 \\ 0 : \text{otros valores de } \tau \end{cases} \quad (13)$$

cuya representación tridimensional se muestra en la Fig. 5.

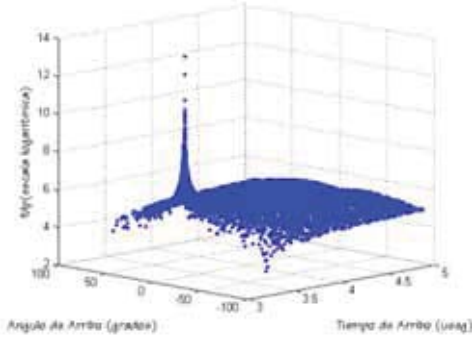


Fig.5 Diagrama tridimensional de la fdp conjunta AOA/TOA para el modelo elíptico.

La función marginal AOA resulta entonces,

$$f_{\theta_b}(\theta_b) = \frac{1}{2A} r_{b2}^2(\theta_b) = \begin{cases} \frac{1}{8\pi a_m b_m} \left(\frac{c^2 \tau_m^2 - D^2}{2c \tau_m - 2D \cos(\theta_b)} \right)^2 : \theta_b \neq 0 \\ \frac{\tau_m c + D}{8\pi a_m b_m} : \theta_b = 0 \end{cases} \quad (14)$$

mientras que la función marginal TOA queda expresada por,

$$f_i(\tau) = \begin{cases} \frac{c(2\tau^2 c^2 - D^2)}{4a_m b_m \sqrt{\tau^2 c^2 - D^2}} : D/c \leq \tau \leq \tau_m \\ 0 : \text{otros valores de } \tau \end{cases} \quad (15)$$

En la Fig. 6 se presentan resultados de comparación entre las fdp marginales, simuladas en Matlab y teóricas.

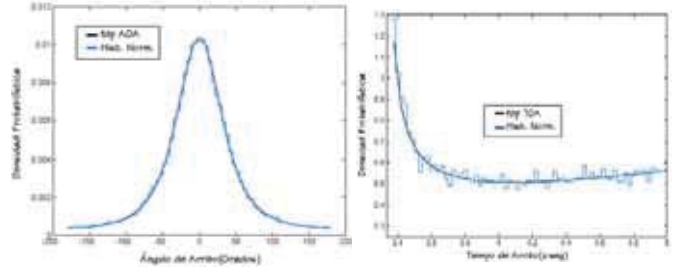


Fig. 6 Comparación entre las fdp marginales.

G. Modelo Circular

La geometría del modelo circular (también referido como modelo de macrocélulas de simple salto [5]) se muestra en la Fig. 7. Este modelo asume que los dispersores se encuentran dentro de un radio R_m alrededor del móvil. Frecuentemente se requiere que dicho radio sea menor que la distancia entre el móvil y la estación base ($R_m < D$). El modelo circular está basado en la suposición de que en ambientes macrocelulares donde la altura de la antena es relativamente alta no van a existir señales provenientes de dispersores cercanos a la estación base.

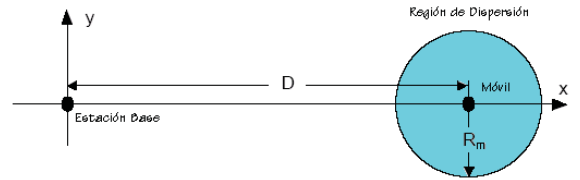


Fig.7 Geometría del modelo circular.

La fdp Conjunta AOA/TOA para el Modelo Circular relativa a la Estación Base tendría entonces una representación como la de la Fig. 8.

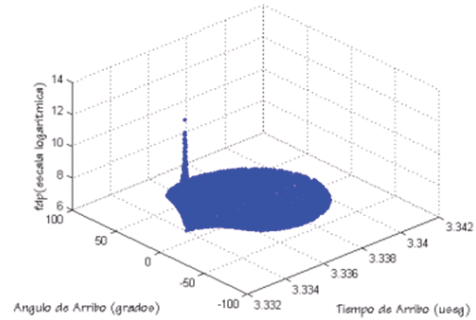


Fig.8 Diagrama tridimensional de la fdp conjunta AOA/TOA para el modelo circular.

H. Modelo Gaussiano

En muchos escenarios de comunicaciones móviles ocurre que el móvil se mueve rodeado de dispersores que se encuentran relativamente cercanos a él. Para el modelado de esta situación es razonable la utilización de un modelo de distribución gaussiano [7], debido a que desde el punto de vista físico este modelo asume que la densidad de los dispersores decrece gradualmente con la distancia desde la antena transmisora, de modo que los dispersores remotos van a tener una menor contribución que los cercanos (ver Fig. 9).

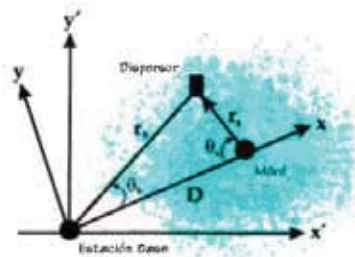


Fig. 9 Geometría del modelo gaussiano.

Asumiendo que la posición de los dispersores alrededor del móvil sigue una distribución gaussiana, dentro de una región de dispersión de ancho a_{rd} , $f_{r_b, \theta_b}(r_b, \theta_b) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{r_b^2}{2\sigma_s^2}}$, la fdp

conjunta general se obtiene como,

$$f_{\tau, \theta_b}(r, \theta_b) = \frac{(D^2 - \tau^2 \cdot c^2)(D^2 \cdot c + \tau^2 \cdot c^3 - 2 \cdot \tau \cdot c^2 \cdot D \cdot \cos(\theta_b))}{4 \cdot \sigma_s \cdot \sqrt{2 \cdot \pi} \cdot (D \cdot \cos(\theta_b) - \tau \cdot c)^3} \cdot \exp\left(-\frac{(2 \cdot D^2 \cdot \cos(\theta_b) - 2 \cdot D \cdot \tau \cdot c - D^2 + \tau^2 \cdot c^2)^2}{2 \cdot (D \cdot \cos(\theta_b) - \tau \cdot c)^2 \cdot \sigma_s^2}\right) \quad (16)$$

cuya representación se muestra en la Fig. 10.

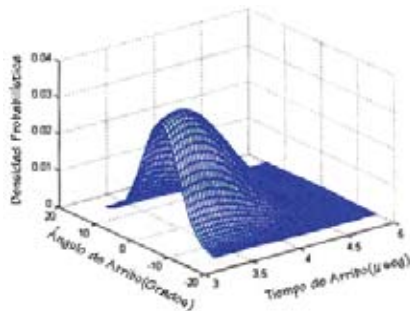


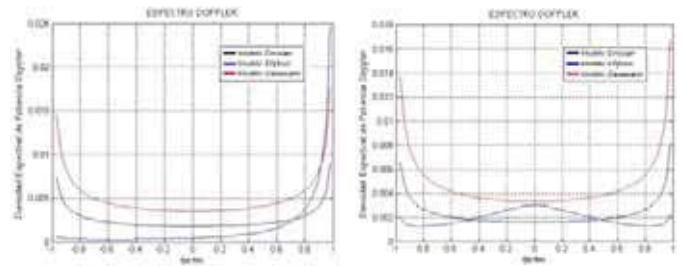
Fig. 10 Diagrama tridimensional de la fdp conjunta AOA/TOA para el modelo gaussiano.

I. Comparación entre Modelos

Para la comparación entre los modelos se puede utilizar el ensanchamiento del ángulo, de importancia en el diseño de las agrupaciones de antenas. Para $a_{rd}/D < 1$, o sea, para ambientes macrocelulares, el modelo gaussiano toma valores de EA cercanos a los del modelo circular; mientras que para valores de $a_{rd}/D > 1$, ambientes microcelulares, el comportamiento del mismo es muy parecido a la del modelo elíptico. Esta es una de las razones por la que el modelo gaussiano es adecuado para ambos ambientes.

En este trabajo se estudió el espectro Doppler de los diferentes modelos presentados. En la Fig. 11 se pueden apreciar los resultados de simulación para un ángulo de movilidad del usuario de 0 y $\pi/2$.

Las expresiones obtenidas de la DEP Doppler para cada modelo se graficaron además para los ángulos de dirección del móvil $\theta_v=0$ y $\theta_v=\pi/2$, para una frecuencia de portadora de 1,9 GHz y una velocidad del móvil de 100Km/h. En ambos casos el modelo elíptico presenta un comportamiento diferente al de los otros modelos.



a) b)
Fig. 11 Comparación del espectro Doppler de los 3 modelos para:
a) $\theta_v=0$, b) $\theta_v=\pi/2$.

III. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un estudio comparativo de los modelos vectoriales tanto geométricos como estadísticos más utilizados: el Modelo Elíptico, el Modelo Circular y el Modelo Gaussiano. Se pudo comprobar como de los modelos geométricos, el Modelo Circular describe mejor los procesos que ocurren en ambientes macrocelulares y que el Modelo Elíptico se adecua más para los escenarios microcelulares. El modelo estadístico estudiado es capaz de analizar tanto ambientes microcelulares como macro-celulares variando el ancho de la región de dispersión. Este modelo al asumir una distribución normal de los dispersores se acerca más a las condiciones reales de los escenarios de comunicaciones móviles. Las expresiones obtenidas para los distintos modelos y el análisis correspondiente del comportamiento de los parámetros en diferentes situaciones brindan datos y estrategias muy importantes para la evaluación, análisis y diseño de los sistemas de arreglos de antenas inteligentes, los cuales se presentan como una alternativa para resolver el problema del ancho de banda de canal limitado, satisfaciendo así la demanda cada día más grande de canales de comunicación por la gran cantidad de estaciones móviles.

REFERENCIAS

- [1] R. Marante y E. Y. Rodríguez, *Estudio de modelos para la caracterización del canal de radio en comunicaciones móviles*, Tesis de Grado, ISPJAE, La Habana 2004.
- [2] J. C. Liberti and T. S. Rappaport, "A geometrically based model for line of sight multipath radio-channels," *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf.*, pp.844-848, April 1996.
- [3] A. Papoulis, *Probability, random variables, and stochastic processes*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York 1991.
- [4] T.S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles & Practice*, New York: Prentice Hall PTR, 1996.
- [5] R. B. Ertel and J. H. Reed, "Angle and time of arrival statistics for circular and elliptical scattering models", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.17, no.11, Nov. 1999.
- [6] B. P. Lathi, *Modern Digital and Analog Communication Systems*, Philadelphia: Holt, Rinehart and Winston, Inc., 2nd ed., 1989.
- [7] D. Covarrubias, and A. Andrade, "Radio Channel Spatial Propagation Model for Mobile 3G in Smart Antenna Systems", *IEICE Trans. Commun.*, vol.E86-B, No.1 Jan 2003.
- [8] R. Janaswamy, *Radiowave Propagation and Smart Antennas for Wireless Communications*, Kluwer Academic Publisher, 2001.